

基于 J-C 模型的 TC18 钛合金动态本构方程构建

贾宝华, 刘思勇, 李 革, 刘 翔, 王丹丹

(内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用电子万能试验机对 TC18 钛合金进行常温准静态压缩实验, 得到该合金在准静态下的实验数据, 根据实验数据, 选用分离式 Hopkinson 压杆对 TC18 钛合金在温度分别为 298、523、773、1 023 K, 应变率分别为 500、1 000、1 500 s^{-1} 下进行动态力学性能实验, 从而获得 TC18 钛合金在高温动态压缩条件下的应力-应变曲线, 并利用 J-C 模型对合金在高应变率下的动态塑性本构关系进行拟合, 最终建立该合金在高温下的动态塑性本构方程。通过对模型的计算结果分析表明, 该模型可以较好地预测 TC18 钛合金在高温与冲击载荷共同作用下的塑性流变应力。

关键词: TC18 钛合金; Hopkinson 压杆; J-C 模型; 冲击载荷

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2018)05-024-05

Establishment of Dynamic Constitutive Equation for TC18 Titanium Alloy Based on J-C Model

Jia Baohua, Liu Siyong, Li Ge, Liu Xiang, Wang Dandan

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: A quasi-static compression experiment at room temperature was performed on the TC18 titanium alloy using an electronic universal testing machine to obtain the experimental data of the alloy under quasi-static conditions. According to the experimental data, the dynamic mechanical properties of TC18 titanium alloy at 298 K, 523 K, 773 K and 1 023 K with strain rates of 500 s^{-1} , 1 000 s^{-1} and 1 500 s^{-1} were tested using a split Hopkinson pressure bar. And the stress-strain curves of the alloy under dynamic compression at high temperatures were obtained. Based on the above experimental data, the J-C model was used to fit the dynamic plastic constitutive relation of the alloy under high strain rate. Finally, the dynamic plastic constitutive equation of the alloy at high temperature was established. The analysis of the model results show that the model can predict the plastic flow stress of TC18 titanium alloy under high temperature and impact load.

Key words: TC18 titanium alloy; split Hopkinson pressure bar; J-C model; impact load

0 引 言

TC18 钛合金(苏联牌号为 BT22)是在 20 世纪 70 年代, 由苏联研制出的一种 $\alpha + \beta$ 型高强钛合金, 名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr^[1-2]。它具有高韧性, 高强度, 优良的塑性、淬透性、锻透性和良好的焊接性等特点^[3-5]。TC18 钛合金在退火状态下, 强度可达 1 080 MPa, 经过强化处理后, 最高强度可

以达到 1 300 MPa, 淬透深度可达 250 mm^[6-7]。由于 TC18 钛合金在截面厚度方向上基本没有淬透性的限制, 所以可以采用热模锻、等温模锻和普通低成本模锻等热加工工艺来进行锻件的生产, 因此适合制造飞机上各种高承载力构件, 包括起落架、支架、横梁以及一些紧固件和弹簧等^[8-11]。

对于在航空领域中被广泛用于制作各种高承载力构件的 TC18 钛合金, 其工作时不可避免的要承受冲击载荷作用, 因此对其动态力学性能方面的研究十分必要。但由于 TC18 钛合金在准静态下的强度非常高, 再加上材料的应变率效应, 如果要进行动态冲击实验, 必须选择有足够强度的霍普金森杆件, 既要保证被测试的 TC18 钛合金发生塑性变形, 又要保

收稿日期: 2018-06-01

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2016MS0112);
内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY16156);
内蒙古科技大学创新基金项目(2016QDL-B11)

通信作者: 贾宝华(1978—), 男, 讲师。

证霍普金森杆件自身处于弹性状态, 因此国内外对 TC18 钛合金动态力学性能的研究很少, 大部分研究是在准静态条件下进行的。在准静态条件下, 由于加载非常缓慢, 材料因塑性变形产生的热量能够及时传递出去, 材料的塑性变形为一个等温过程, 但在冲击载荷下, 由于冲击时间很短, 塑性变形所产生的热量来不及传递散发出去, 因此这种情况下的塑性变形为绝热过程。很明显, 冲击加载下, 材料的应变率、温度、应变和绝热温升与材料的塑性变形是耦合在一起的, 正确理解它们之间的耦合作用对预测材料的塑性变形行为是非常重要的。几十年来, 人们一直致力于以材料模型的形式确定材料的变形行为, 即通过建立本构模型对其力学性能进行表征。材料的本构模型即本构关系, 是指材料的流变应力与变形温度、应变率以及变形程度之间的关系。本构关系也是有限元软件对材料变形过程进行数值仿真的重要基础, 它是对材料性能的最基本表征^[12]。在不同的变形条件下, 不同的材料有着不同的本构关系^[13], 它是结构或材料宏观力学性能的综合反映, 能够反映物质宏观性质的数学模型。

材料的本构模型一般可以分为 2 类: 一类为物理基础的本构模型, 一类为经验或半经验的本构模型, 相较于物理模型, 经验或半经验模型可以通过有限的物理实验采用较少的材料参数来表征材料的力学性能。J-C 模型即为典型的经验模型, 由于其同时考虑了材料的应变率硬化和热软化效应, 被广泛用来表征材料在高温和高应变率下的变形行为。

本研究拟在准静态实验的基础上, 得到 TC18 钛合金在准静态下的塑性屈服强度, 以此为依据选择霍普金森压杆型号, 进行不同温度及应变率下的冲击加载实验, 从而得到该合金在不同工况下的力学性能, 并以实验数据为基础, 采用 J-C 模型进行力学性能表征, 通过实验数据分别确定模型中的应变率项和温度项参数, 最终得到 TC18 钛合金在高温和冲击载荷共同作用下的塑性本构方程, 并与实验结果进行对比验证, 以期对 TC18 钛合金的有限元模拟奠定基础, 同时为合金的结构设计和优化提供依据。

1 实验

1.1 试样制备

本试验中所用的 TC18 钛合金棒材由宝鸡钛业股份有限公司提供, 化学成分见表 1。根据试验设备的相关参数及应变率范围, 选取动态试验试样尺

寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。

表 1 TC18 钛合金棒材的化学成分 (w/%)

Table 1 Chemical composition of TC18 titanium alloy bar

Al	Mo	V	Cr	Fe	O	N	Ti
5.23	4.80	5.02	1.07	1.09	0.14	0.03	Bal.

1.2 实验方案

TC18 钛合金动态力学性能实验是在分离式 Hopkinson 压杆 ($\phi 13 \text{ mm}$) 上进行的。由于试件的屈服强度相对较大, 为 1 060 MPa, 高速冲击时需要较高的能量, 而且要使分离式 Hopkinson 压杆在工作时处于弹性阶段, 所以进行高应变率实验比较困难。本次实验拟测试 TC18 钛合金在应变率分别为 500、1 000、1 500 s^{-1} , 温度分别为 298、523、773、1 023 K 的动态压缩行为。为了保证实验结果的可重复性, 每个应变率下至少进行 2 次试验, 取比较相近的 2 组实验结果的平均值作为最终实验结果。

2 J-C 本构模型构造

TC18 钛合金的组织类型为 $\alpha + \beta$ 型, 非常适合采用 J-C 模型来表征其在冲击荷载下的力学性能^[14]。J-C 模型考虑了温度、应变率和应变等因素, 形式简单, 具有清晰的物理解释, 同时参数较少, 比较容易求解。J-C 模型适用于描述金属材料从低应变率到高应变率下的动态行为, 甚至可以用于准静态实验结果的分析, 其基本表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: A 为准静态下的屈服强度, B 为应变强化系数, n 为应变硬化系数, C 为应变率敏感系数, m 为温度敏感系数, T_r 为参考热力学温度, T_m 为熔点热力学温度, ε 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率^[15]。

在 J-C 模型中, 有一部分参数是已知的或可由事先进行的准静态下的实验结果得到, 例如 A 为 1 060 MPa, T_r 为 298 K, T_m 为 1 951 K, $\dot{\varepsilon}_0$ 为 0.033 s^{-1} 。其它参数是未知的, 需要结合图像, 利用最小二乘法进行推导, 最终得到 TC18 钛合金高温动态塑性本构方程。

2.1 采用 J-C 模型表征准静态力学性能

模型选取准静态压缩实验下 $\dot{\varepsilon} = 0.033 \text{ s}^{-1}$ 、 $T = 298 \text{ K}$ 时的实验数据拟合参数 A 、 B 、 n , 在常温准静

态条件下,式(1)中的后两项可简化为数值1,则公式可简化为:

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2)$$

将 TC18 钛合金近似为线性强化弹塑性材料,根据准静态实验数据,可以得出屈服应力为 1 060 MPa,即 A 为 1 060 MPa,代入式(2)得:

$$\sigma - 1\,060 = B\varepsilon^n \quad (3)$$

令:

$$Y = \sigma - 1\,060, X = \varepsilon \quad (4)$$

应用最小二乘法拟合方程,得到式(5):

$$Y = 1\,883.7X^{0.8955} \quad (5)$$

即 B、n 分别为 1 883.7 和 0.895 5。将式(5)代入式(2)得到式(6):

$$\sigma = 1\,060 + 1\,883.7\varepsilon^{0.8955} \quad (6)$$

将由式(6)计算的数据和准静态下的实验曲线进行对比,结果如图 1 所示。

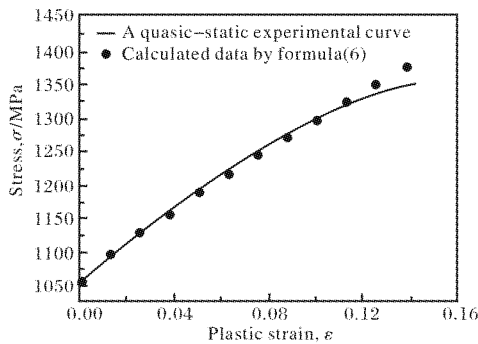


图1 式(6)计算数据与准静态下应力-应变曲线的对比图
Fig.1 Comparison diagram of calculated data by formula(6) and a quasi-static stress-strain curve

从图 1 可以看出,式(6)的计算数值不能很好的拟合实验曲线。经反复拟合对比,发现对于 TC18 钛合金而言,一元二次方程比幂函数更符合实验曲线的增长趋势,为了更好的对实验数据进行拟合,将式(3)改写为式(7):

$$\sigma - 1\,060 = \lambda_1\varepsilon^2 + \lambda_2\varepsilon + \lambda_3 \quad (7)$$

由式(4)在坐标系下应用最小二乘法拟合方程,得到式(8):

$$Y = -6\,882.3X^2 + 3\,094.3X - 1.6528 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得式(9):

$$\sigma = 1\,060 - 6\,882.3\varepsilon^2 + 3\,094.3\varepsilon - 1.6528 \quad (9)$$

将由式(9)计算的数据和准静态下的实验曲线进行对比,结果如图 2 所示。通过图 1 与图 2 对比可以看出,式(9)与实验曲线更为接近,因此采用

式(9)能够更好的表征 TC18 钛合金在准静态下的塑性力学行为。

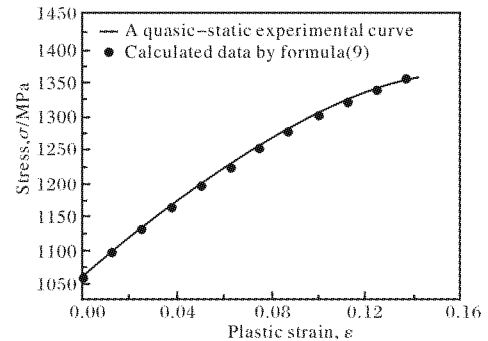


图2 式(9)计算数据与准静态下应力-应变曲线的对比图
Fig.2 Comparison diagram of calculated data by formula(9) and a quasi-static stress-strain curve

2.2 采用 J-C 模型表征动态力学性能

2.2.1 确定 J-C 模型中应变率项

在常温下, J-C 本构方程可以简化为式(10):

$$\sigma_i = \sigma_0 \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right] \quad (10)$$

其中: σ_i 为不同应变率下的屈服应力, σ_0 为准静态加载时的屈服应力, $\dot{\varepsilon} = 0.033 \text{ s}^{-1}$ 。令:

$$Y = \frac{\sigma_i}{\sigma_0} - 1, X = C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \quad (11)$$

使用最小二乘法对参数进行拟合得到 C 为 0.046 4, 将数值代入式(10)得到式(12):

$$\sigma = 1\,060 \left[1 + 0.0464 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{0.033} \right) \right] \quad (12)$$

由于常温下, TC18 钛合金的动态塑性流变应力未随着应变的增加而增长,趋势接近于平稳,因此在方程中不考虑应变项,只考虑应变率项,故得到的常温下 TC18 钛合金的动态本构方程如式(12)所示。

将由式(12)计算的数据和常温动态下的实验曲线进行对比,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,式(12)可以很好的预测 TC18 钛合金在常温冲击载荷下的流变应力。

2.2.2 确定 J-C 模型中温度项

通过温度为 523、773、1 023 K, 应变率为 500、1 000、1 500 s^{-1} 的动态实验应力-应变曲线(共 9 组数据)来拟合 m。

在高温下, J-C 本构方程可以简化为式(13):

$$\sigma(T^*) = \sigma(T_r) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (13)$$

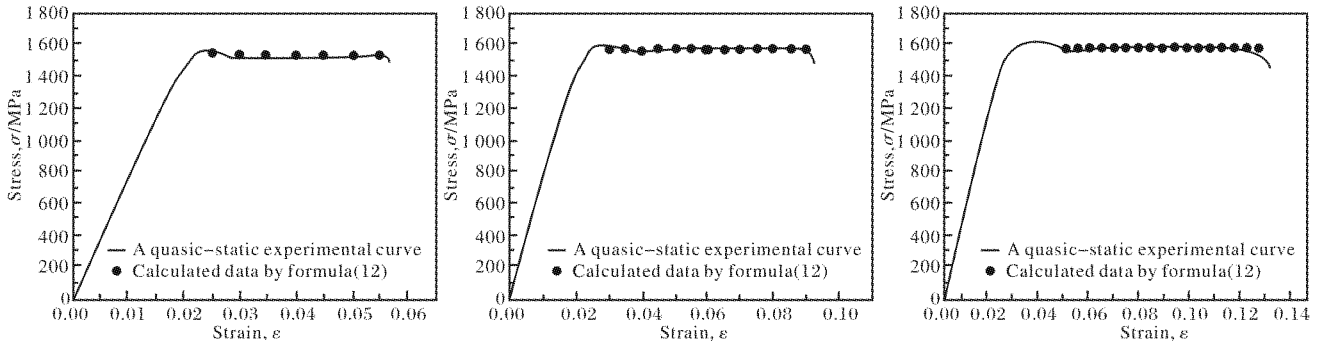


图 3 式(12)计算数据与常温动态应力-应变曲线的对比图

Fig. 3 Comparison diagrams of calculated data by formula(12) and dynamic experimental stress-strain curves at normal temperature: (a)500 s⁻¹; (b)1 000 s⁻¹; (c)1 500 s⁻¹

式中： $\sigma(T^*)$ 为高温下合金的屈服应力， $\sigma(T_r)$ 为参考温度下合金的屈服应力。

将式(13)两边取对数得式(14)：

$$\ln\left(1 - \frac{\sigma(T^*)}{\sigma(T_r)}\right) = m \ln\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right) \quad (14)$$

式中： T_r 为 298 K， T_m 为 1 951 K。令：

$$Y = \ln\left(1 - \frac{\sigma(T^*)}{\sigma(T_r)}\right), X = \ln\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right) \quad (15)$$

使用最小二乘法对参数进行拟合，得到 $m = 0.85$ ，代入(13)得式(16)：

$$\sigma = \left[1 + 0.0464 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{0.033}\right] \left[1 - \left(\frac{T - 298}{1653}\right)^{0.85}\right] \quad (16)$$

在高温下，TC18 钛合金动态塑性流变应力随应变的增加变化很小，趋势接近于平稳，因此在方程中亦不考虑应变项，只考虑应变率项和温度项，故得到的高温与冲击载荷共同作用下 TC18 钛合金的本构方程如式(16)所示。将由式(16)计算的数据与高温动态下的实验曲线进行对比，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，式(16)可以较好的预测 TC18 钛合金在高温与冲击载荷共同作用下的塑性流变应力。

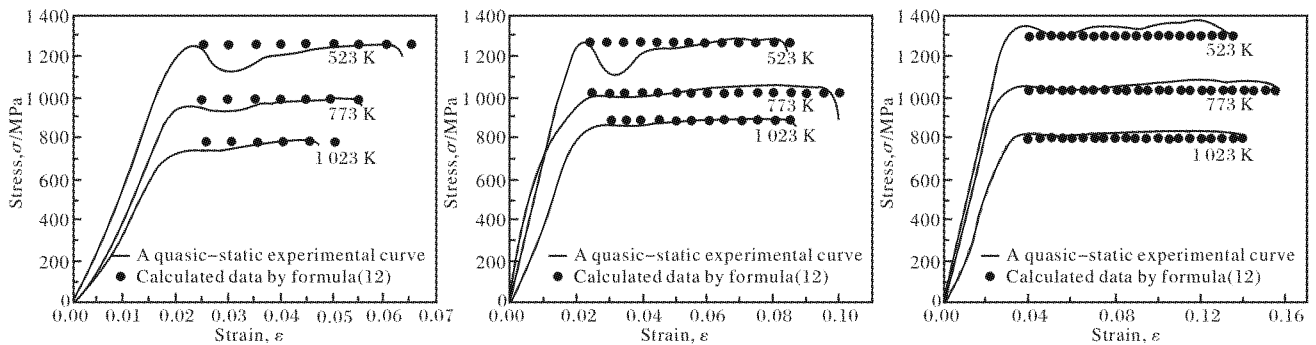


图 4 式(16)计算数据与高温动态应力-应变曲线的对比图

Fig. 4 Comparison diagrams of calculated data by formula(16) and dynamic experimental stress-strain curves at high temperatures: (a)500 s⁻¹; (b)1 000 s⁻¹; (c)1 500 s⁻¹

3 结 论

基于实验数据，建立了 TC18 钛合金在高温与冲击载荷共同作用下的塑性本构方程：

$$\sigma = 1060 \left[1 + 0.0464 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.033}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{T-298}{1653}\right)^{0.85}\right]$$

通过对确定的本构方程的计算结果和实验结果进行对比，表明该模型可以较好地预测 TC18 钛合金

在高温与冲击载荷共同作用下的塑性流变应力。

参考文献

- [1] 邓喆. 固溶-时效对热轧态 TC18 钛合金显微组织、力学性能和织构的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [2] Peng W W, Zeng W D, Zhang Y W, et al. Relationship between color of oxidation layer and mechanical properties of TC18 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(2): 358-361.

- [3] Jia B H, Song W D, Tang H P, et al. Hot deformation behavior and constitutive model of TC18 alloy during compression[J]. Rare Metals, 2014, 33(4): 383-389.
- [4] 沙爱学, 李兴无, 王庆如. 变形量对 TC18 钛合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2014(11): 34-37.
- [5] Jia B H, Song W D, Tang H P, et al. Hot deformation behavior of TC18 titanium alloy [J]. Thermal Science, 2013, 17(5): 1523-1528.
- [6] 贾百芳. 热处理对 TC18 钛合金显微组织参数及力学性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [7] 李礼. TC18 钛合金本构关系及其盘件等温模锻的仿真应用[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [8] 王媛, 董健, 王德琴. 热处理工艺对 TC18 合金锻件组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 93-95.
- [9] 陈缙萦. TC18 钛合金的高温变形与蠕变行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [10] 李天龙. TC18 钛合金疲劳开裂损伤行为的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [11] Zhang Y Q, Guo H Z, Liu R, et al. Microstructure and mechanical properties of β isothermal forged TC18 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 634-638.
- [12] 刘芳, 单德彬, 吕炎. 热变形参数对 LD7 铝合金流动应力的影响[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(1): 55-58.
- [13] 杨晨晨. 金属粉末的粘弹塑性本构方程的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [14] 贾宝华, 刘思勇, 李革. 国内 TC18 钛合金本构关系研究进展[J]. 钛工业进展, 2017, 34(4): 9-12.
- [15] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague: International Ballistics Committee, 1983: 541-547.

国内外新闻

我国开发出一种钛传输层的新型高效钙钛矿太阳能电池

中科院合肥物质科学研究院固体所科研人员成功开发出一种新型高效钙钛矿太阳能电池, 该钙钛矿电池利用金属钛作为电子传输层, 其光电转换效率可达 18.1%, 是目前金属材料与钙钛矿层直接接触器件所达到的最高转换效率。

钙钛矿太阳能电池有正式和反式 2 种结构, 反式平面结构钙钛矿太阳能电池凭借制备工艺简单、可低温成膜、无明显迟滞效应等优点受到越来越多的关注, 但是仍然面临诸多问题, 如光电转换效率稍显不足, 有机电子传输层的热稳定性差、成本昂贵等。为解决这些问题, 固体所研究人员利用金属钛取代有机电子传输层, 设计出新型钙钛矿太阳能电池结构。相比于有机电子传输层的制备条件, 金属钛层的制备过程更为简单, 成本更为低廉。

(来源: 安徽日报)

云南钛业牵头的国家重点研发计划项目顺利通过中期检查

8月2日, 科技部高技术研究发展中心组织专家对云南钛业股份有限公司牵头承担的国家重点研发计划《低成本高耐蚀钛及钛合金管材与高品质钛带制造技术开发及应用》项目进行了中期检查。项目负责人、昆钢公司副董事长张竹明对项目一体化组织实施、协同推进情况及开发研究的突出成果进行了汇报, 项目中期申请国内发明专利 39 件, 起草行业标准 1 项, 发表学术论文 25 篇, 获省部级科技奖励 2 项, 并取得了系列技术成果。

专家组进行了现场考察, 审阅了中期执行情况报告、中期财务决算报告及相关证明材料, 听取了项目负责人的中期执行情况汇报, 经质询和讨论, 认为项目围绕电子束冷床炉熔炼技术, 开展了“以轧代锻”短流程为主线的钛及钛合金管/带材制造技术的研究与开发, 全面完成了中期研究任务和考核指标, 达到了预期效果。

该项目由云南钛业股份有限公司牵头, 西北有色金属研究院等 19 家单位参与, 项目针对高耐蚀钛及钛合金管材加工及复杂海洋环境应用过程中性能协同控制难、制造成本高、工艺流程长、产品质量与附加值低等共性问题, 从基础前沿、重大共性关键技术到应用示范进行全链条创新设计和一体化组织实施, 解决管/带材加工及复杂海洋环境应用过程中存在的共性科学问题, 突破系列关键技术, 开发出海洋石油钻探用高耐蚀钛合金大规格无缝管、海洋工程与海水淡化装备用高性能卷焊钛管和配套大卷重钛带低成本制造成套技术并实现产业化应用, 打破国外技术封锁, 满足国家战略需求。

(来源: 中国有色金属报)